

Hans Joachim KECKE, Hansjürgen RICHTER

Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg

FLIESSVERHALTEN VON FEINDISPERSEN SUSPENSIONEN

Zusammenfassung. Zunehmend stehen beim hydraulischen Transport feinkörnige Fördergüter an. Sie sind als homogene Suspensionen zu betrachten. Ihr Fließverhalten ist durch die Gesetze der Rheologie beschreibbar. Zu den zu erwartenden Abhängigkeiten sind die Erkenntnisse der Kolloidwissenschaft heranziehbar. Neben einer Präzisierung der Abgrenzung Feinkorn - Grobkorn wird im Beitrag auf die diesbezüglichen Zusammenhänge bei Suspensionen eingegangen.

1. Vorbemerkung

Der hydraulische Transport wird zunehmend bei der Bewältigung der anstehenden, vielfältigen Aufgaben der Feststoffförderung berücksichtigt.

Zum einen ist damit eine Ausweitung auf die verschiedensten Stoffsysteme zu verzeichnen. Zum anderen gilt es jedoch auch, die Effektivität bei den schon klassischen Fördergütern, wie Kohle, Erz, Sand und Kies, zu verbessern. Beides führt zu einer verstärkten Beschäftigung mit den Transport- bzw. Bewegungsverhältnissen bei hohem Feinkornanteil.

Bei den entsprechenden Institutionen und Spezialprojektanten ist ein gewisser Abschluß, d. h. eine entsprechende Sicherheit bei der Auslegung, damit auch der Anlagenoptimierung für die sogenannten heterogenen Gemische gegeben. Hinsichtlich der Berücksichtigung der Wirkung eines höheren Feinkornanteiles oder auch der Nutzung der Möglichkeiten des Transportes im sogenannten homogenen Bereich bestehen Probleme. So gilt es, die Effekte eines hohen Feinkornanteiles bei gegebenen Stoffsystemen sicher zu erfassen. Dies betrifft vor allem den Bereich des Transportes über kürzere Strecken, gegeben z. B. bei Asche, auch Zwischenprodukten in der Aufbereitung. Beim Ferntransport steht dagegen die gezielte Aufbereitung zur Diskussion, um den Transportaufwand durch erhöhte Konzentration und Senkung des spezifischen Energieaufwandes zu minimieren. In diesem Zusammenhang ergeben sich Fragen des Transportes im laminaren Bereich bis hin zur Zugabe spezieller Additive zur Erhöhung der Fließfähigkeit.

Mit dem Beitrag soll auf einige solche Probleme beim Transport von feindispersen Suspensionen eingegangen werden. Dazu muß jedoch vorerst nochmals auf die Abgrenzung Bezug genommen werden.

2. Abgrenzung der quasi homogenen Suspensionen

Bezüglich der Definition der homogenen bzw. heterogenen Dispersion sind zwei Herangehensweisen zu verzeichnen. Als Kriterien werden die Gleichverteilung des dispersen Feststoffes über den Rohrquerschnitt beim Transport und zum anderen die Betrachtbarkeit der Dispersion als quasi Kontinuum genutzt.

Der erfaßte Bereich nach der Gleichverteilungs-Definition schließt zwar das Kontinuum ein, geht jedoch weit darüber hinaus. Es werden hierbei auch grobdisperse Suspensionen erfaßt, wie sie bei sehr hohen Fördergeschwindigkeiten vorliegen. Unterstützt werden kann eine solche Situation durch eine hohe Konzentration. In einem solchen Fall kann jedoch nicht von stetig verteilten Stoffeigenschaften gesprochen werden, es liegt ein typisches Zweiphasensystem vor. Ein solches Gemisch muß damit auch als ein heterogenes System (disperser Feststoff im Dispersionsmittel) behandelt werden. Zur Berechnung könnte allerdings auch formal ein Modell mit "verwischten" Eigenschaften herangezogen werden. Jedoch auch die auf dieser Basis angegebenen Abgrenzungen beachten zumeist doch eine gewisse selbständige Bewertung der Suspension. Parzonka /1/ nennt z. B. folgende Grenzen (für $\rho_M = 2650 \text{ kg/m}^3$):

- homogene Suspension	$d_k < (10 \dots 20) \mu\text{m}$
- quasi-homogene Mischung	$(10 \dots 20) \mu\text{m} < d_k < (100 \dots 150) \mu\text{m}$
- feindisperse Mischung	$(0,1 \dots 0,15) \text{ mm} < d_k < (1,5 \dots 2) \text{ mm}$
- grobdisperse Mischung	$d_k > (1,5 \dots 2) \text{ mm}$

Bei der Abgrenzung unter dem Aspekt des Kontinuumsverhaltens findet die verhinderte Sedimentation im Ruhezustand bzw. auch beim laminaren Fließen stärker Beachtung. Die nicht losgelöste Betrachtung vom hydraulischen Transport beinhaltet jedoch auch hierbei oftmals gewisse Inkonsequenzen im Hinblick auf eine Gleichverteilung bei turbulenter Strömung, allerdings bei üblichen und nicht überhöhten Fördergeschwindigkeiten. Davon ausgehend wurde in /2/ und in Fortführung in /3/ ein entsprechender Vorschlag unterbreitet:

- quasi homogenes Verhalten

$$\text{Re}_k = \frac{w_s d_k}{\nu_F} \frac{\rho_M - \rho_F}{\rho_F} < 0,1$$

- heterogenes Verhalten

$$\text{Re}_k > 10$$

Bezogen auf die oben genannte Dichte (Sand, Kies in Wasser) bedeutet dies die Grenzen:

$$d_k < 40 \mu\text{m} \qquad d_k > 190 \mu\text{m}$$

Man kann also eine gewisse Übereinstimmung feststellen.

Die genannte Abgrenzung läßt sich unter Bezug auf die Kolloidchemie weiter präzisieren. Ein quasi Kontinuum liegt bei kolloiddispersen Systemen vor. Grob läßt sich hierfür eine zulässige Teilchengröße von $1\mu\text{m}$ nennen. Damit ergibt sich bei weiterhin einer gewissen Inkonsistenz in Hinblick auf den hydraulischen Transport

- Feinkorn (homogenes bzw. quasi-homogenes System)

. kolloiddisperse Suspension

$$Re_k < 10^{-6}$$

. mechanische Suspension

$$10^{-6} < Re_k < 10^{-1}$$

- Grobkorn (heterogenes System)

. feindisperse Mischung

$$10^{-1} < Re_k < 10$$

. grobdisperse Mischung

$$Re_k > 10$$

Die Unterscheidung in kolloiddisperse und mechanische Suspensionen rechtfertigt sich schon im Hinblick auf den Einsatz der klassischen Viskosimetrie. Bei mechanischen Suspensionen treten zunehmend Probleme durch Sedimentation, aber auch durch Wand-Entwässerungseffekte auf. Insofern wird verschiedentlich empfohlen, vom Rotationsviskosimeter, ganz abgesehen von anderen Techniken, abzugehen und unmittelbar das Rohr bzw. Rohrviskosimeter zu nutzen. Die Übertragung auf beliebige Rohrdurchmesser bedarf weiterer ergänzender Betrachtungen.

3. Kraft- bzw. Teilchenwechselwirkungen

Bei der Modellierung der Bewegungsverhältnisse geht man üblicherweise von

- der Schwerkraft, gemindert um die Auftriebskraft
- den Strömungskräften (Widerstands-, Auftriebs-, Magnuskraft)
- der Reibungskraft
- den Stoßkräften

aus. Diese mechanischen Kraftwirkungen nehmen mit abnehmenden Teilchenabmessungen stark ab, Tab. 1. Gleiches trifft damit auf die Sinkgeschwindigkeit zu.

Andererseits erhöht sich mit abnehmender Teilchenabmessung die Teilchenzahl und die Feststoffoberfläche, Tab. 2. Gekoppelt mit ebenso abnehmenden Teilchenabstand gewinnen die u. a. durch elektrische Ladung bedingten Kräfte

- Coulomb'sche Kraft,
- van der Waals'sche Kräfte,
- chemische Bindungskräfte,
- ggf. auch magnetische Wechselwirkungskräfte

stark an Bedeutung. Sie bestimmen nun wesentlich die Wechselwirkungen und somit auch das Fließverhalten.

Zu beachten ist, daß bei einem derartigen Zerkleinerungsgrad das Haufwerk eine beträchtliche freie Energie aufweist. Nur unter diesem

Gesichtspunkt betrachtet, würde ein erhebliches Agglomerationspotential vorliegen. Eine entsprechende Zusammenballung ist jedoch im allgemeinen bei hydraulischen Transportanlagen nicht zu verzeichnen. Die Begründung hierfür ergibt sich aus dem Vorhandensein abstoßender Kräfte zwischen den einzelnen Teilchen.

Die Stabilität erklärt sich aus der DLOV-Theorie (Derjaguin-Landau-Overbeek-Verwey-Theorie) /4/. Vor allem die elektrostatischen Wechselwirkungskräfte, im Zusammenhang zu sehen mit sich ausbildenden Adsorptionsschichten und deren Wirkung überwiegen gegenüber den van-der-Waals'schen Anziehungskräften.

Jedoch nicht nur bezüglich der Stabilität, sondern ebenso hinsichtlich des Fließverhaltens der Suspension, muß von einer formal heterogenen Betrachtungsweise auch für diesen Bereich abgegangen werden. Von Einfluß sind

- Struktur und Zusammensetzung der wäßrigen Lösung,
 - Struktur und Zusammensetzung sowie Genese der Feststoffteilchen,
 - die Wechselwirkung zwischen Lösung und Feststoffoberfläche sowie
 - die Wechselwirkung zwischen den Teilchen
- insbesondere bei der Bewegung im rohrströmungsbedingten Scherfeld.

Viskosität von Lösungen:

Wasser ist bekanntlich teilweise speziell strukturiert (Cluster-Bildung) /5/. Durch in Lösung befindliche Moleküle bzw. Ionen kann sowohl eine Strukturbruchung als auch weitere Strukturierung erfolgen. Eine Einschränkung der Beweglichkeit (Hydrathülle) ist vor allem bei kleinen Ionen (großes Ionenpotential: Ladungszahl zu Ionenradius) gegeben. Strukturbrechend wirken vor allem große Ionen (Cl^- , K^+ , Br^- , J^-). Letzteres kann mit einer Absenkung der dynamischen Zähigkeit gegenüber reinem Wasser verbunden sein.

Teilcheneigenschaften:

Zumeist stehen beim hydraulischen Transport makroskopische Dispersionen bei kristallinem Aufbau der festen Phase an. In Abhängigkeit vom Kristallaufbau bzw. der Bindungsart ergeben sich damit auf der Oberfläche unterschiedlich verteilte Energieinhalte. Störungen im Ladungsausgleich (Ionengitter) bzw. freie Valenzen (Atombindung) bedingen polare Oberflächen. Jedoch auch unpolare Oberflächen können auftreten, z. B. bei Molekülgittern bzw. van-der-Waals'scher Bindung. Natürlich entspricht die Oberflächenenergie nicht der, die den Bindungskräften einer theoretischen Bruchfläche zuzuordnen wäre. Nur die durch die verbleibende Ladung bedingten elektrostatischen Kräfte sowie die van-der-Waals-Kräfte sind als Wechselwirkungskräfte heranzuziehen. Damit kann jedoch auch eine Zeitabhängigkeit der Wirkungen verbunden sein.

Wechselwirkung Flüssigkeit-Feststoff:

An der Phasengrenze sind die Wechselwirkungen zwischen Feststoffoberfläche und Flüssigkeit zu beachten. Sie begrenzen sich nicht nur auf

die unmittelbar benachbarten Moleküle, sondern zeigen eine weiterreichende Wirkung (0,05 bis 0,2 μm und mehr).

Bei reinem Wasser kommt es auch hier zur verstärkten Strukturierung des Wassers. Dies kann sowohl eine Strukturbruchung bei unpolarer Feststoffoberfläche als auch eine erhöhte Orientierung mit ggf. Wasserstoffbrückenbindungen bei polarer Oberfläche sein. Die im letzten Fall gegebene Haftung ist bekanntlich als die Existenz einer Hydrathülle zu verstehen.

Auf einen weiteren Aspekt ist hinzuweisen. Mit der Hydratation ist zwangsläufig ein in Lösung gehen von Ionen verbunden. Es kommt damit zu sogenannten unausbleiblichen Ionen in der flüssigen Phase. Der Vorgang führt jedoch auch zur weiteren Aufladung der Oberfläche. Durch entsprechende, systemgegebene, elektrolytische Lösung der flüssigen Phase kann dies ggf. unterdrückt werden (Ladungsnullpunkt).

Natürlich steht dann auch hier die schon genannte unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Ionen hinsichtlich Strukturbruchung oder -orientierung, nun auf das Grenzschichtwasser, wie bei Lösungen an. Bei im Wasser befindlichen bzw. gelösten Partikeln (Ionen) tritt eine Wechselwirkung zwischen Feststoffoberfläche, Wasser und Partikeln auf. Zu beachten ist dabei die bei beiden Feststoffen ggf. vorliegende Hydrathülle. Neben elektrostatischen Wechselwirkungen (Coulomb'sche Kräfte) treten nichtelektrostatische (van-der-Waals-Kräfte) auf. Unmittelbar an der Oberfläche können z. B. Mizellkolloide oder Tenside (besonders Anlagerung bei gegebener polarer Gruppe) wie auch Ionen gebunden sein. Bei letzterem kommt es somit zu einem ausgesprochenem Oberflächenpotential mit der Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht:

- spezifisch adsorbierte Ionen (dehydratisiert) unmittelbar an der Oberfläche, das Potential wesentlich bestimmend,
- angelagerte Gegenionen (Stern-Schicht und diffuse Übergangsschicht).

Von Einfluß ist dabei das Ionenpotential (Adsorbierbarkeit nach Ionenreihe $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \dots$), aber auch der vorliegende Grad der Hydratation (Oberfläche sowie Ion) sowie insbesondere die vorliegende Elektrolytkonzentration in der flüssigen Phase (Kompression der Doppelschicht mit zunehmender Konzentration). Zu beachten ist, daß die Adsorption mehrwertiger Ionen auch zu einer Kompensation bzw. Umkehrung der Ausgangsladung führen kann.

In Abhängigkeit vom Zustand der in der flüssigen Phase befindlichen Moleküle kann es zur nichtorientierten oder orientierten Adsorption kommen. Letzteres trifft für Dipolmoleküle bzw. unipolar-polare Moleküle (Polymere) zu.

Wechselwirkung zwischen den Feststoffteilchen:

Hier sind vor allem die elektrostatischen und van-der-Waals-Kräfte zu nennen. Bei entsprechendem Feststoff treten zusätzlich magnetische Kräfte auf.

Wie schon deutlich wurde, sind hinsichtlich der elektrostatischen Kräfte vor allem die Verhältnisse an der Oberfläche zu beachten. Eine Schichtbildung tritt ein durch Chemisorption, zwischenatomare Bindungskräfte (Dispersionsadsorption) und vor allem bedeutungsvoll, die elektrostatische Adsorption.

Die van-der-Waals-Kräfte zeichnen sich durch eine geringe Reichweite aus, erreichen aber bei geringem Teilchenabstand (< 50 nm) eine beträchtliche Größe:

$$|F_{vdW}| = \frac{C_H d}{24 s^2} \quad C_H = \text{Hamaker-van-der-Waals-Konstante} \\ (\approx 10^{-20} \text{ J})$$

Durch zumeist gegebene Oberflächenladung, modifiziert durch die Zusammensetzung der wäßrigen Phase sowie die ausgebildete Adsorptionsschicht, wirken abstoßende Kräfte. Dies vor allem, da gleichsinnige Ladung bei den im allgemeinen gleichartigen Teilchen vorliegt. Bei der wechselseitigen Durchdringung der elektrischen Doppelschicht kann die Abstoßungskraft beträchtliche Werte erreichen, Tab. 3 /6/. Dies um so mehr, je größer die Ladung, je dicker auch die Hydrathülle:

$$F_C = \frac{1}{4 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{s^2} \quad \epsilon_0 = \text{Influenzkonstante } (8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As/Vm})$$

Es kommt damit quasi zu einer Potentialbarriere.

4. Konsequenzen bezüglich des Fließverhaltens

Für das Verständnis der Veränderung des Fließverhaltens von Suspensionen gegenüber der reinen Flüssigkeit sind, wie die Ausführungen zeigten, die Kenntnis der Strukturierung der einzelnen Bereiche sowie die Wechselwirkungsverhältnisse zwischen den einzelnen Teilchen Voraussetzung. Die diskutierten Kräfte, bei Grobkorn zu vernachlässigen, bestimmen zunehmend mit kleiner werdenden Teilchenabmessungen die Bewegungsverhältnisse. Der Einfluß verstärkt sich mit wachsender Konzentration, führt dann ggf. sogar zu einer stabilen, kaum sedimentierenden Suspension.

Eine Strukturierung liegt an und für sich, wie kurz erläutert, schon beim reinen Wasser vor. Allerdings besteht hier eine hohe Beweglichkeit bzw. Umbildungsfähigkeit der Cluster, also der Wasserstoffbrücken. Schon bei in Lösung befindlichen Ionen oder Molekülen wirkt sich die erhöhte Strukturierung oder auch Strukturbrechung sofort auf die Viskosität aus.

Bei vorhandenen Teilchen erhöht sich die Strukturierung weiter (Ausbildung einer elektrischen Doppelschicht oder auch Anlagerung von unipolar-polaren Makromolekülen). Hinzu kommen die Wechselwirkungskräfte

zwischen den Teilchen selbst, in Rückkopplung befindlich mit der Art der ausgebildeten Adsorptionsschicht.

Im Strömungsfeld, beim Rohr einer teleskopartigen Scherung, liegt darüber hinaus eine Beeinflussung nun wieder der strukturierten Bereiche vor. Zum Beispiel wird die diffuse Übergangsschicht bei Umströmung bzw. Scherung beeinflusst, d. h. zumindest deformiert.

Als wesentliche Einflußfaktoren sind somit insgesamt zu nennen

- Polarisation bzw. Aufladung der Teilchenoberfläche
- Ionenkonzentration und Art der Ionen in der wäßrigen Lösung
- Vorhandensein von Mizellkolloiden, Tensiden bzw. makromolekularen Verbindungen.

Beim hydraulischen Transport, den zumeist anstehenden Feststoffen, sind besonders die beiden zuerst genannten Aspekte bedeutungsvoll. Sie stehen, wie schon angedeutet, in Wechselwirkung. So reicht die Angabe des Zeta-Potentiales (Potential etwa zwischen Sternschicht und umgebenden Fluid) für die elektrostatische Ladung allein nicht aus. Durch z. B. entsprechende Ionenkonzentration kann die elektrische Doppelschicht stark komprimiert werden, was zu einer geänderten Fernwirkung führt.

Der genannte dritte Einflußkomplex wird beim hydraulischen Transport vor allem in der Richtung zu nutzen sein, daß die Fließfähigkeit bei laminarer Bewegung (bekannte Form der Turbulenzzurückdrängung) oder die Stabilität der Suspension verbessert werden.

Ausgehend von einer rein hydrodynamischen Wechselwirkung vorliegender Teilchen im Fluid sowie phänomenologischer Beschreibung des Fließverhaltens, insbesondere von niedrigkonzentrierten Suspensionen, liegt eine Vielzahl von Gleichungen der Art

$$\tau = \eta \frac{dw}{dy} \quad \text{mit } \eta = f(c_R)$$

vor. Zu nennen ist hier vor allem die Gleichung von Einstein

$$\eta = \eta_0 (1 + 2,5 c_R)$$

mit der Annahme kugelförmiger Teilchen ohne zwischenpartikuläre Wechselwirkung.

Der Gültigkeitsbereich wurde zumeist überschätzt, weshalb man dann allgemein den Übergang auf

$$\tau = K \cdot \left(\frac{dw}{dy} \right)^n$$

findet. Bei zumeist beobachteten pseudoplastischem Verhalten ($n < 1$) kommt hier die Berücksichtigung der Adsorptions- bzw. Solvatschicht

und der partikularen Wechselwirkung zum Ausdruck. Es ist zu erwarten, daß eine Abweichung vom newtonschen Verhalten um so eher eintritt, je größer die elektrische Doppelschicht (f -Potential) und je geringer ihre Kompression (Ionenkonzentration).

Mit zunehmender Konzentration und damit weiterer Verstärkung der Wechselwirkung muß dann ein quasi statischer Kraftanteil (Binghamsche Fließgrenze τ_0) zur Überwindung der Wechselwirkungen erwartet werden:

$$\tau = \tau_0 + K \left(\frac{dw}{dy} \right)^n$$

Es liegt auf der Hand, daß die Wechselwirkungen zur Rohrwand anders geartet sind als diejenigen innerhalb der Suspension. Damit sollte der "Anbindungsbedingung" an die Rohrwand, offensichtlich auch abhängig vom Rohrmaterial, besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Die verschiedenen Hinweise auf einen vom Rohrdurchmesser abhängigen Wandeffekt bestätigen dies.

Einen zweckmäßigen Weg zur analytischen Erfassung des Fließverhaltens weisen Holzwüller /7/ und Eyring /8/. Mit der Vorstellung eines um die einzelnen Teilchen aufgebauten Potentialfeldes und der Gleichgewichts-anordnung (Energieminimum) im Ruhezustand, die bei Bewegung zu überwinden ist, ist eine Berechnung des Fließgesetzes bei konkreter Zuordnung der partikularen Wechselwirkung denkbar. Dabei sind also aus der Gleichgewichtslage heraus quasi Potentialbarrieren beim Übergang zur benachbarten bzw. nächsten Energieminimallage zu überwinden.

5. Zusammenfassung

Zur Ermittlung des Fließverhaltens von Suspensionen versagen die bekannten Berechnungsmethoden der Mischungsbewegung beim hydraulischen Transport. Auch die experimentelle Ermittlung des Fließgesetzes, z. B. mittels Rotationsviskosimeter, führt bei der Umrechnung auf die Rohrströmung verschiedentlich offensichtlich zu Widersprüchen mit dem gemessenen Druckverlust.

Eine Erklärung für dieses scheinbare Phänomen gibt die genauere Analyse der Wechselwirkung zwischen den Feststoffteilchen der Suspension im Zusammenhang mit der Adsorptionsschichtausbildung und der Strukturierung der wäßrigen Lösung. Einzubeziehen in diese Fragestellung ist ebenso die Wechselwirkung mit dem Rohrmaterial, nicht nur in Bezug auf die Rauigkeit. Damit gewinnen an Bedeutung die Bindungsart und die Strukturierung der Feststoffteilchen, der Molekülaufbau, insbesondere auch der sich in der Lösung befindlichen Partikel sowie die Ionenkonzentration und -art in der wäßrigen Lösung. Zeta-Potential und pH-wert charakterisieren z. T. die Verhältnisse.

Es läßt sich absehen, daß auf dieser Basis zumindest eine fundierte Interpretation des Verhaltens von Suspensionen möglich ist.

Tab. 1: Mechanische Kraftwirkungen

Schwerkraft	$F_S = \rho_M g \frac{\pi}{6} d_k^3$	$\sim d_k^3$
Strömungskraft	$F_W = 3 \pi \rho_F w_s d_k$	$\sim d_k$
Reibungskraft	$F_R = \mu (\rho_M - \rho_F) g \frac{\pi}{6} d_k^3$	$\sim d_k^3$
Stoßkraft	$F_{St} \sim (\rho_M - \rho_F) \frac{\gamma}{6} d_k^3$	$\sim d_k^3$
Sinkgeschwindigkeit	$w_s = \frac{g}{18 \nu_F} \frac{\rho_M - \rho_F}{\rho_F} d_k^2$	$\sim d_k^2$

Tab. 2: Systemverhältnisse

Teilchenanzahl	$n = \frac{6 c_R V}{\pi d_k^3}$	$\sim \frac{c_R}{d_k^3}$
Feststoffoberfläche	$A_o = \frac{6 c_R V}{d_k}$	$\sim \frac{c_R}{d_k}$
Teilchenabstand	$s \approx d_k \sqrt[3]{\frac{\pi}{6 c_R}}$	$\sim d_k \cdot c_R^{-1/3}$

Tab. 3: Wechselwirkungsbedingte Energien bei Mineralkörnern

Wechselwirkung	Korngröße		
	0,1 μm	1 μm	10 μm
Van-der-Waals-Anziehung	$\approx 10 \text{ kT}$	$\approx 100 \text{ kT}$	$\approx 1000 \text{ kT}$
Elektrostatische Abstoßung	$0 - 10^2 \text{ kT}$	$0 - 10^3 \text{ kT}$	$0 - 10^4 \text{ kT}$
Kinetische Energie bei Sedimentation	10^{-13} kT	10^{-6} kT	10 kT

$k = \text{Boltzmann-Konstante}$
 $(1,38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1})$

Literatur:

- /1/ Parzonka W.
Maximale, mittlere und lokale Feststoffkonzentration in horizontalen Rohrleitungen
7. Kolloquium Massenguttransport durch Rohrleitungen, Meschede 1986, BRD, Proceedings, Beitrag A
- /2/ Kecke H. J.; Tarjan I.
Einsatz und Weiterentwicklung des hydromechanischen Feststofftransportes
Wissensch. Zeitschr. d. TH Magdeburg 26 (1982) 1, S. 9-13
- /3/ Kecke H. J.; Richter H.
Fließverhalten von fest-flüssig-Systemen und dessen Beschreibung
Kolloquium Hydromechanisation 4, Karl-Marx-Stadt 1985, DDR Proceedings, Bd. 1, Beitrag A 4
- /4/ Sonntag H.
Lehrbuch der Kolloidwissenschaft
VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1977
- /5/ Luck W. A. P.
Zur Struktur des Wassers und der wäßrigen Lösungen
Tenside 11 (1974) 3, S. 145-155
- /6/ Schubert H.
Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Bd. III
VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1984
- /7/ Holzmüller W.
Zur Platzwechseltheorie des viskosen Fließens
Kolloid-Zeitschrift 155 (1957), S. 110-121
- /8/ Glasstone S.; Laidler K. J.; Eyring, H.
The Theory of Rate Processes
Mc Graw Hill, New York 1941

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Maciej ZARZYCKI

Wpłynęło do Redakcji 1987.04.6

ПРОЦЕССЫ ПРОТЕКАНИЯ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ВЗВЕСЕЙ

Р е з ю м е

В гидравлическом транспорте всё увеличивается доля мелкозернистого транспортного материала, который в этом случае надлежит рассматривать как гомогенные взвеси. Процесс их протекания можно описать при помощи правил реологии. К ожидаемым в этом случае зависимостям можно отнести эксперименты из области коллоидальных систем. В работе кроме определения границы крупно и мелкозернистости приняты во внимание относящиеся к этому зависимости для взвесей.

PROCESY PRZEPŁYWU DROBNOZIARNISTYCH ZAWIESIN

S t r e s z c z e n i e

W transporcie hydraulicznym wzrasta udział drobnoziarnistego materiału transportowanego. Należy go, w tym wypadku rozpatrywać jako zawiesiny homogeniczne. Proces ich przepływu można opisać za pomocą zasad reologii. Do oczekiwanych tu zależności można odnieść doświadczenia z dziedziny układów koloidalnych. W artykule obok sprecyzowania granicy drobno-gruboziarnistości uwzględniono odnoszące się do tego zależności dla zawiesin.